منهـــج علـــم الفيزيـــاء مــن
بنك المعرفة المصري
للصف الثالث الثانوي

هذا العمل صدقة جارية لموتانا وموتي المسلمين جميعا

نسأل الله العلي العظيم ان يجمعنا بهم في جنان الخلد جميعا ان شاء الله

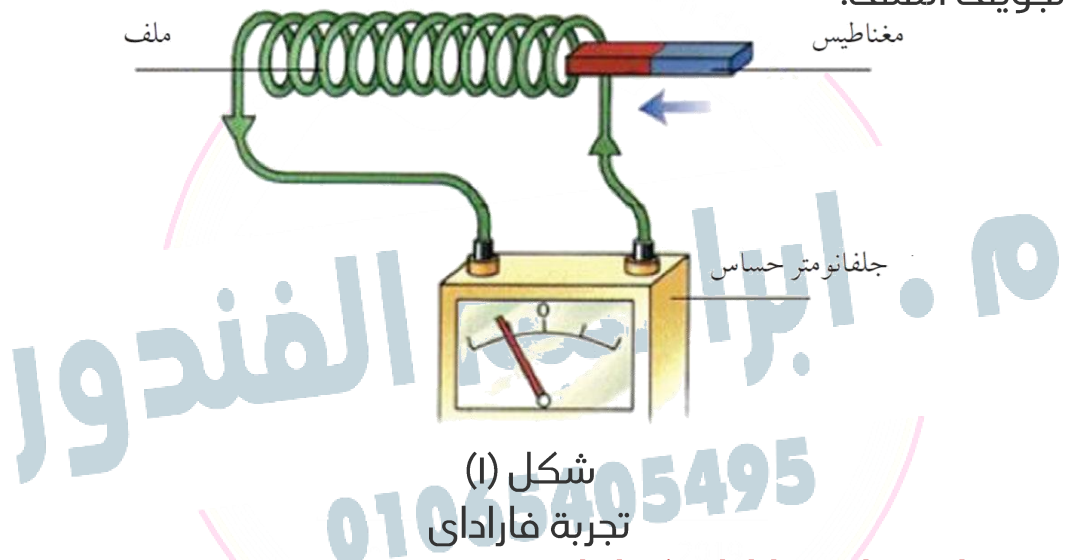
#جيو_ابراهيم_الغندور

مدرس الجيولوجيا والعلوم البيئة

شرح الباب الثالث كاملا
(الحث الكهرومغناطيسي)

تجربة فارادای للحث الكهرومغناطيسى
Faraday's Experiment of Electromagnetic Induction

قام العالم " فارادای" عام ١٨٣١م ببعض التجارب التى أدت إلى اكتشاف طريقة جديدة للحصول على تيار كهربى خلال الموصِّل عن طريق تأثير المجال المغناطيسى، بعيداً عن التفاعلات الكيميائية التى تحدث فى الأعمدة والبطاريات الكهربية. وبهذا بدأ عهد توليد الكهرباء عن طريق المولدات الكهربية. تتلخص تجارب فارادای فى إعداد ملف من سلك معزول متصل طرفيه بجلفانومتر حساس، ثم تحريك مغناطيس مستقيم)قضيب مغناطيسى (إلى داخل وخارج تجويف الملف.



شكل (١)
تجربة فارادای

يمكن أن نلخص نتائج تجارب فارادای كما يلى:

١ .انحراف مؤشر الجلفانومتر مع حركة المغناطيس دخولاً أو خروجًا من قلب الملف، دليل على تولد قوة دافعة كهربية و تيار كهربى مستحث خلال الملف.

٢ .يختلف اتجاه انحراف مؤشر الجلفانومتر الدال على اتجاه التيار المستحث حسب اتجاه حركة المغناطيس، أو حسب نوع القطب المغناطيسى الذى يتحرك بالنسبة للملف.

٣ .لا يتولد تيار مستحث عند توقف حركة المغناطيس داخل أو خارج الملف.

٤ .تتولد قوة دافعة كهربية و تيار مستحث فى الملف عند تثبيت المغناطيس وتحريك الملف.

٥ .يزداد مقدار انحراف المؤشر الدال على شدة التيار المستحث بزيادة سرعة الحركة، أو عدد لفات الملف، أو قوة المغناطيس، أو وجود قلب من الحديد المطاوع داخل الملف.

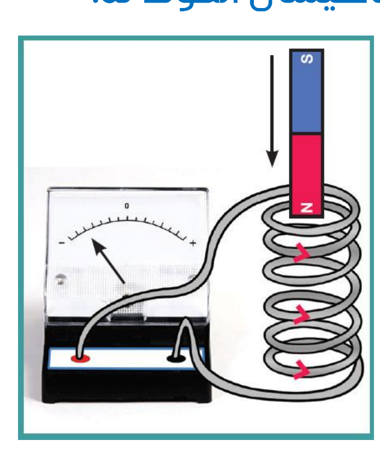
قوانين فارادای للحثّ
Faraday’ s Laws of Induction

قانون فارادای الأول للحثّ Faraday’s First Law of Induction

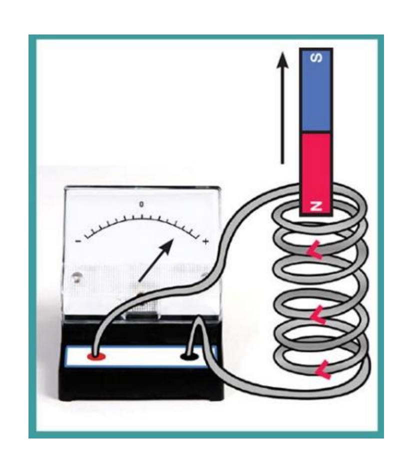
أدرك فارادای أنّ القوّة الدافعة الكهربية يمكن توليدها نتيجة تغيير في مقدار التدفّق المغناطيسی الذی يجتاز الملفّ، وأنّ مقدار التدفّق المغناطيسی يُقدَّر بعدد خطوط المجال المغناطيسی التی تمرّ فی لفّة أو مساحة محدّدة. ونصّ قانون فارادای للحثّ على أنّ: «مقدار القوّة الدافعة الكهربية المستحثّة المتولّدة فی ملفّ تتناسب طرديّا مع حاصل ضرب عدد اللفّات ومعدّل التغيّر فی التدفّق المغناطيسی الذی يجتاز هذه اللفّات.»

قاعدة لنز The Lenz's Rule

لاحظ الفيزيائی الألمانی هينريش فريدريك لنز Heinrich Friedrich Lenz أنّ دفع القطب الشمالی (N) لمغناطيس إلى داخل الملفّ يولّد فی الملفّ تيّارًا مستحثّا له اتّجاه يولّد مجالاً مغناطيسيّا معاكسًا لاتّجاه المجال المطبَّق، أی يتحوّل سطح الملفّ المقابل إلى قطب شمالیN ، ويسبّب تنافرًا مع المغناطيس المدفوع إلى الداخل (شكل ١). وكذلك جذب قطب المغناطيس N بعيدًا عن اللفّات يولّد تيّارًا مستحثّا اتّجاهه فی الملفّ يجعل سطح الملفّ قطبًا مغناطيسيّا جنوبيّا S يعمل على جذب المغناطيس المُبعَد إلى الداخل (شكل ٢). نتيجة لتلك التجارب وضع لنز قاعدة لتحديد اتّجاه التيّار المتولّد فی اللفّة أو الدائرة الكهربية من دون أن يقدّم معلومات عن مقدار التيّار المستحثّ أو عن القوّة الدافعة الكهربية. أصبحت هذه القاعدة تُعرَف اليوم بقانون لنز Lenz’ s Law. ينصّ قانون لنز على أنّ: «التيّار الكهربی المستحثّ المتولّد فی ملّف يسری باتّجاه بحيث يولّد مجالاً مغناطيسيّا يعاكس التغيّر فی التدفّق المغناطيسی المولّد له.»



شكل (1)



شكل (٢)

قانون فارادای الثانی للحثّ Faraday's Second Law of Induction

نستنتج إذًا أنّ القوّة الدافعة الكهربية المستحثّة تنشأ بحيث تقاوم التغيُّر فى التدفّق المغناطيسى المسبِّب فى توليدها. إنّ استخدام مفهوم التدفّق المغناطيسى فى عدد من اللفّات بالإضافة إلى قانون لنز يجعلنا نكتب نصّ قانون فارادای بشكله الأكثر استخداماً: «إنّ القوّة الدافعة الكهربية المستحثّة المتولَّدة فى موصّل تساوى سالب حاصل ضرب عدد اللفات فى معدّل التغيُّر فى التدفّق المغناطيسى بالنسبة إلى الزمن». ويُكتَب قانون فارادای على شكل المعادلة التالية:

$$emf = -N \Delta\varphi_m \Delta t$$

حيث

$$\varphi = B\ A \cos\theta$$

والإشارة السالبة تشير إلى أنّ القوّة الدافعة الكهربية تعاكس السبب المولِّد لها بحسب قانون لنز.

القوة الدافعة المستحثّة فى سلك مستقيم Inducted emf in a Straight Wire

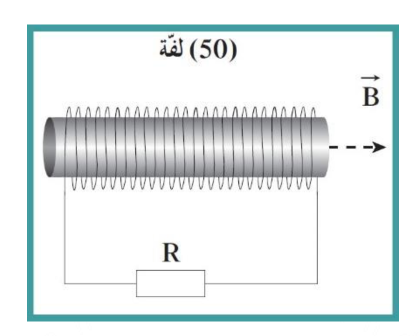
عندما يتحرك سلك مستقيم بسرعة خطية عموديًا على اتّجاه مجال مغناطيسى منتظم، تتولد emf مستحثّة بين طرفيه. ويتحدد اتّجاه التيّار المستحثّ فى السلك بقاعدة اليد اليمنى لفلمنج (شكل ٣)، حيث يشير اتّجاه الإبهام إلى اتّجاه حركة السلك، والسبابة على اتّجاه المجال المغناطيسى، والوسطى إلى اتّجاه التيّار المستحثّ.



شكل ٣

مثال ١

ملفّ مُكوَّن من (50) لفّة حول أسطوانة فارغة مساحة قاعدتها $(1.8)m^2$ ويؤثّر عليه مجال مغناطيسى منتظم اتّجاهه عمودى على مستوى قاعدة الأسطوانة)شكل ٤ .(احسب:



شكل ٤

(أ) مقدار القوّة الدافعة المستحثّة فى الملفّ إذا تغيّر مقدار شدّة المجال المغناطيسى بشكل منتظم من T(0)إلى T(0.55) خلال .s(0.85)

(ب) مقدار شدّة التيّار المستحث فى الملفّ إذا كانت المقاومة فى الدائرة المغلقة المتصلة بالملف ثابتة وتساوى .Ω(20) = R

طريقة التفكير فى الحلّ

١ .حلِّل:

أُذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم turns :

$$N = (50)$$
$$\Delta t = (0.85)s$$
$$A = (1.8)m^2$$

لنأخذ الاتّجاه الموجَب اختيارى، الاتّجاه الذى يجعل مُتَّجه مساحة السطح والمجال المغناطيسى لهما الاتّجاه نفسه.

$$B_i = (0)T \quad gB_f = (0.55)T$$
$$R = (20)\Omega$$

غير المعلوم:

(أ) القوّة الدافعة الكهربية المستحثّة   emf = ?

(ب) التيّار الكهربى المستحثّ   I = ?

٢ .احسب غير المعلوم:

(أ) باستخدام معادلة قانون فارادای:

$$emf = - N \Delta\varphi_m \Delta t$$

وباستخدام معادلة التدفّق المغناطيسى التى تخترق عدداً من اللفّات φ = B A cos θوتعويضها فى المعادلة السابقة، نجد:

$$emf = - N A \cos\theta \ \Delta B \Delta t$$

وبترتيب المعادلة، نجد:

$$B\Delta t\Delta \ emf = - N A \cos\theta$$

بالتعويض عن المقادير المعلومة، نجد:

$$emf = -(50)(1.8)(0.550.85) \cos 0 = (-58.24)V$$

(ب) أمّا التيّار المستحثّ فيُحسَب بتعويض emf بقانون أوم:

$$I = emfR = - 58.2420 = (-2.91)A$$

الإشارة السالبة تؤكِّد أنّ اتّجاه التيّار المستحثّ معاكس للاتّجاه الموجَب الاختيارى الذى حدّدناه.

٣ .قيِّم :هل النتيجة مقبولة؟

إنّ اتّجاه التيّار المستحثّ فى الملفّ يُولِّد مجالاً مغناطيسيّا يعاكس التغيُّر فى التدفُّق المغناطيسى المطبَّق على الملفّ، وهذا يتناسب مع قانون لنز ويؤكّد صحّة النتيجة.

الحث المتبادل بين ملفين
Mutual Induction between two Coils

لدينا ملفان لولبيان من سلك معزول
- الأول: متصل ببطارية – مفتاح – أمتر – ريوستات وسمى الملف الابتدائى.
- الثانى: متصل بجلفانومتر حساس وسمى الملف الثانوى.

هناك أربع حالات تتولد فيها قوة دافعة كهربية مستحثة وتيار مستحثً فى الملف الثانوى.

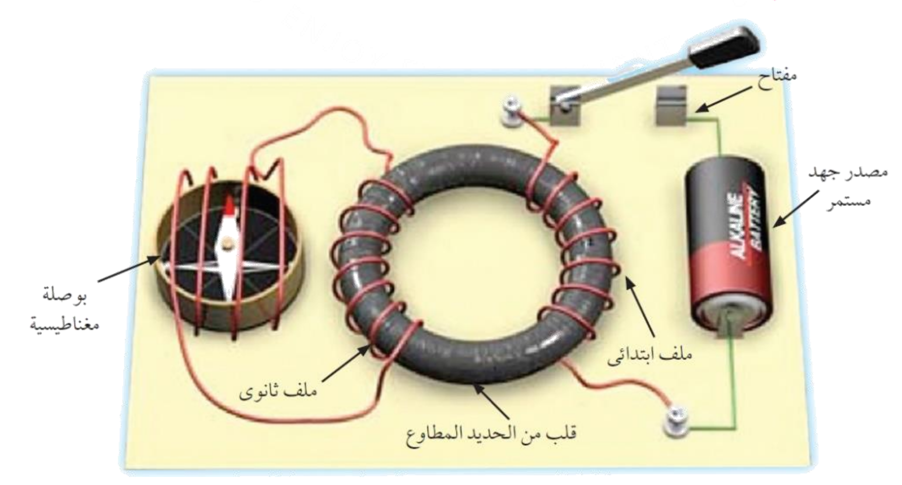
١ .إغلاق دائرة الملف الابتدائى، فيعمل الملف الابتدائى حينها كقضيب مغناطيسى نتيجة مرور التيار الكهربائى خلاله. ثم تحريكه قربًا أو بعدًا عن الملف الثانوى.

٢ .تثبيت الملف الابتدائى بالقرب أو داخل الملف الثانوى، ثم زيادة أو تقليل شدة التيار المار فى الملف الابتدائى عن طريق ريوستات. فيعمل التغير فى شدة التيارخلال الملف الابتدائى على تغير الفيض المغناطيس الناشئ عنه، والذى يقطع لفات الملف الثانوى مولدًا قوة دافعة كهربية مستحثة وتيارًا مستحثّ فى الملف الثانوى

٣ .لحظة غلق أو فتح دائرة الملف الابتدائى، تتولد قوة دافعة كهربية لحظية مستحثة وتيار لحظى مستحثّ فى الملف الثانوى نتيجة نمو أو اضمحلال التيار فى الملف الابتدائى، الذى بدوره يؤدى إلى تغير لحظى فى الفيض المغناطيسى الناشئ عنه و الذى يقطع لفات الملف الثانوى.

لاحظ عند ثبوت شدة التيار فى الملف الابتدائى، لا يتولد أى تيار مستحث فى الملف الثانوى، لثبوت الفيض المغناطيس الذى يقطع لفات الملف الثانوى.

٤ .إمرار تيار متردد AC خلال الملف الابتدائى.



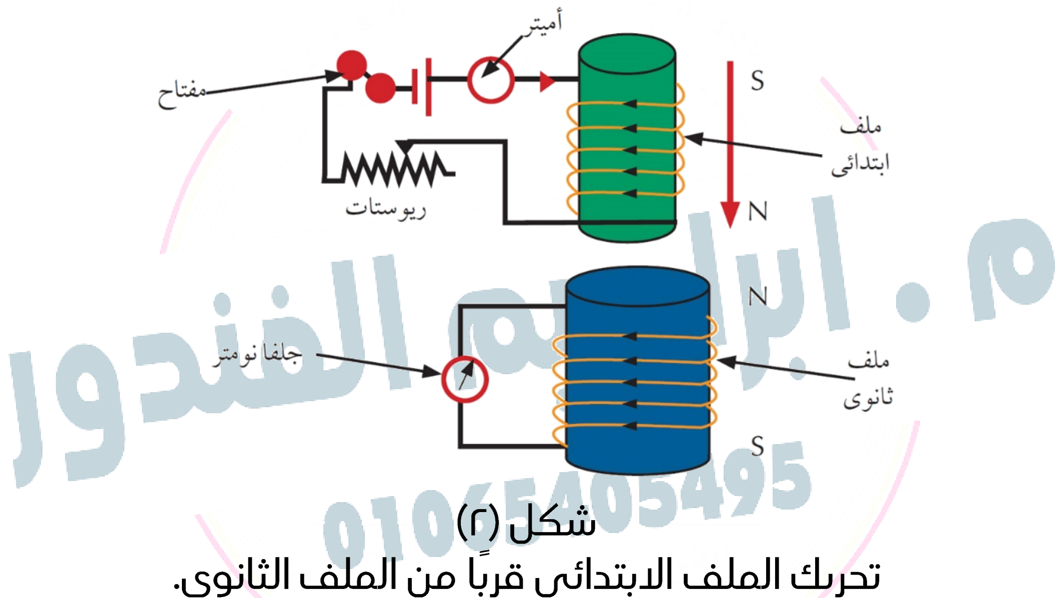
شكل (١)
الحث المتبادل بين ملفين.

اتجاه التيار المستحث فى الملف الثانوى:
Direction of the Induced Current of Secondary Coil

بتطبيق قاعدة لنز على التيار المستحث فى الملف الثانوى، نجد أن:

١ .يمر التيار المستحث فى الملف الثانوى فى اتجاه معاكس للتيار المار فى الملف الابتدائى عند:

- تحرك الملف الابتدائى قربًا من الملف الثانوى.
- زيادة شدة التيار فى الملف الابتدائى.
- لحظة غلق دائرة الملف الابتدائى.
- مرور تيار متردد خلال الملف الابتدائى.

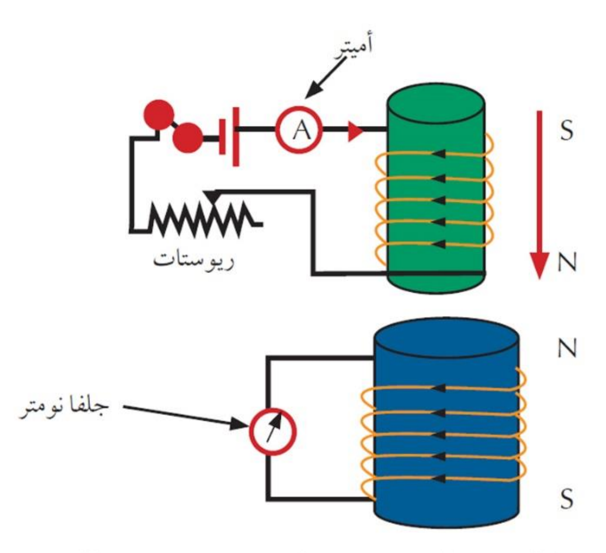


شكل (٢)
تحرك الملف الابتدائى قربًا من الملف الثانوى.

فى هذه الحالات يزداد معدل قطع الفيض المغناطسى للفات الملف الثانوى، فيمر التيار المستحث فى الاتجاه الذى يضاد التغير الذى سببه)تقريب الملف(، فيكون تيارًا عكسيًّا للتيار المار فى الملف الابتدائى.

٢ .يكون التيار المستحث فى الملف الثانوى فى اتجاه طردى للتيار المار فى الملف الابتدائى عند:

- إبعاد الملف الابتدائى عن الملف الثانوى.
- تقل شدة التيار فى الملف الابتدائى.
- لحظة فتح دائرة الملف الابتدائى.



شكل (٣) إبعاد الملف الابتدائى عن الملف الثانوى.

فى هذه الحالات يقل معدل قطع الفيض المغناطيسى للفات الملف الثانوى، فيمر التيار المستحث فى الاتجاه الذى يضاد التغير الذى سببه (إبعاد الملف)، فيكون تيارًا طرديًا للتيار المار فى الملف الابتدائى.

حساب القوة الدافعة الكهربية المتولدة فى الملف الثانوى:
Calculation of the EMF Generated in a Secondary Coil

تبعًا لقانون فارادای تتناسب القوة الدافعة المستحثة فى الملف الثانوى مع التغير فى معدل قطع خطوط الفيض له

$$Emf_2 \propto -\Delta\Phi_2\Delta t$$

$$\Delta\Phi_2 \propto \Delta I_1$$

$$Emf_2 \propto -\Delta I_1\Delta t$$

$$Emf_2 = -M\,\Delta I_1\Delta t$$

حيث $\Delta I_1\Delta t$ معدل التغير فى شدة التيار خلال الملف الابتدائى و M معامل الحث المتبادل بين الملفين الذى يعتمد على:

- عدد لفات الملفين.
- شكل وأبعاد الملفين.
- نفاذية قلب الملفين.
- المسافة الفاصلة بين الملفين.

ووحدة قياس معامل الحث المتبادل بين ملفين هى الهنرى ويعادل فولت.ثانية / أمبير

مثال (١)

أُحسب القوّة الدافعة الكهربائية الناتجة عن الحثّ المتبادَل بين ملفّين إذا تغيّر التيّار الكهربائى فى الملفّ الابتدائى من A(20)إلى صفر خلال s(0.04)، علماً أنّ معامل الحثّ المتبادَل يساوى H(2)

طريقة التفكير فى الحلّ

١ .حلِّل :أُذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم:

$$M = (2)H$$
$$I_2 = 0 - 20 = (-20)A$$
$$\Delta t = (0.04)s$$

غير المعلوم:

$$Emf_2 = ?$$

٢ .أُحسب غير المعلوم:

باستخدام العلاقة الرياضية التالية:

$$Emf_2 = -m\ I_2 \Delta t$$

وبالتعويض عن المقادير المعلومة، نجد:

$$Emf_2 = -2 \times (-20)0.04 = (+1000)V$$

٣ .قيِّم :هل النتيجة مقبولة؟

إنّ النتيجة مقبولة وتبيّن أنّ انخفاض التيّار الكهربائى فى الملفّ الابتدائى بمعدّل كبير يؤدّى إلى تولّد قوّة دافعة كهربائية كبيرة فى الملفّ الثانوى تقاوم التغيُّر الحاصل فى الملفّ الابتدائى وهذا يتناسب مع قانون لنز.

الحث الذاتى فى ملف
Self Induction of a Coil

يحدث الحث الذاتى فى ملف إذا مرَّ فيه تيار متردد، أو لحظة فتح، أو غلق دائرة الملف إذا اتصل بمصدر جهد مستمر. فعند مرور تيار كهربى متغير فى ملف من سلك معزول تعمل كل لفة من لفاته كمغناطيس صغير، وتولد مجالاً مغناطيسيّا متغيرًا يقطع اللفات المجاورة، وهذا ما يستحث قوة دافعة كهربية وتيارًا فى نفس الملف نتيجة التغير فى شدة التيار المار فيه.

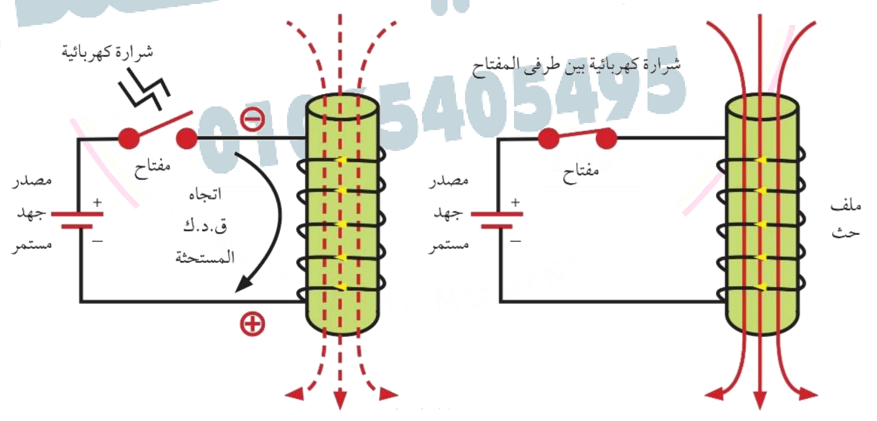
اتجاه التيار المستحث فى ملف بالحث الذاتى:
Direction of Induced Current in a Coil by Self Induction

بتطبيق قاعدة لنز، نجد أن:

١ .القوة الدافعة المستحثة عبر الملف تكون فى اتجاه معاكس لجهد المصدر المستمر فى لحظة غلق دائرة الملف.

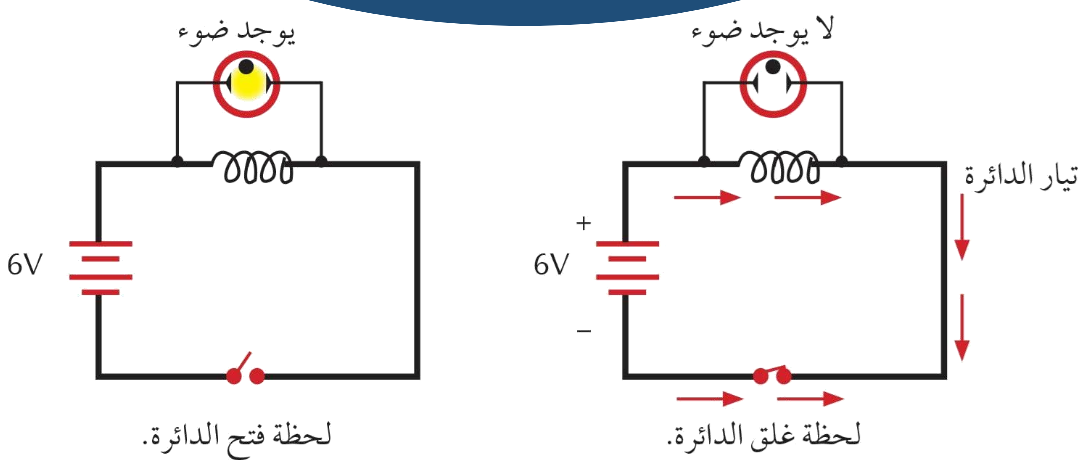
هذه القوة الدافعة العكسية تبطئ من معدل نمو التيار خلال الملف، مما يطيل من فترة نمو التيار خلال الملف.

٢ .يكون اتجاه القوة الدافعة العكسية المستحثة فى الملف طرديّا عند لحظة فتح دائرة الملف، هذه القوة الدافعة الطردية تبطئ من معدل اضمحلال التيار خلال الملف. وتؤدى أيضًا إلى زيادة فرق الجهد عند موضع القطع مما قد يسبب حدوث شرارة كهربائية.



شكل ١ الحث الذاتى فى ملف

ويمكن استغلال القوة الدافعة الكهربية الطردية لحظة القطع فى إضاءة مصباح نيون يحتاج V(180)حتى يومض بمصدر مستمر قوته الدافعة .V(12)



شكل ٢ إضاءة مصباح نيون باستخدام القوة الدافعة الكهربية

حساب القوة الدافعة الكهربية المتولدة فى ملف حث:
Calculation of Emf Generated in an Induction Coil

تبعًا لقانون فارادای تتناسب القوة الدافعة الكهربائية المستحثة مع معدل التغير فى الفيض المغناطيسى الذى يقطع الموصل (الملف).

$$\Delta\Phi\Delta t - Emf\ \alpha$$

$$\Delta\ \Phi\ \alpha\ \Delta I$$

$$\Delta I\Delta t - Emf\ \alpha$$

$$\Delta I\Delta t\ Emf = -L$$

حيث ∆I∆t معدل التغير فى شدة التيار المار فى الملف

L معامل الحث الذاتى للملف الذى يعتمد على:

- أبْعاد وعدد لفات الملف.
- نفاذية قلب الملف.
- المسافة الفاصلة بين لفات الملف.

ووحدة قياس معامل الحث الذاتى هى الهنرى ويعادل فولت . ثانية / أمبير.

معامل الحث الذاتى لملف Self Inductunce of a Coil :

يساوى عدديّا القوة الدافعة الكهربية المستحثة فى ملف عندما تتغير شدة التيار المار فيه بمعدل (1)A/s ويُعْرف الهنرى بأنه معامل الحث الذاتى لملف الذى يستحث قوة دافعة كهربية مقدارها (1)V. عندما يتغير التيار خلاله بمعدل (1)A/s.

الملف عديم الحث Inductive Coil :



الشكل ٣ ملف عديم الحث

لمنع حدوث الحث الذاتى فى ملف :يلف سلك الملف لفّا مزدوجًا فيتولد مجالان مغناطيسيان متساويان ومتضادان عند مرور التيار فى الملف، فيتلاشى الفيض المغناطيسى، وينعدم الحث الكهرو مغناطيسى.

التيارات الدَّوامية Eddy current :

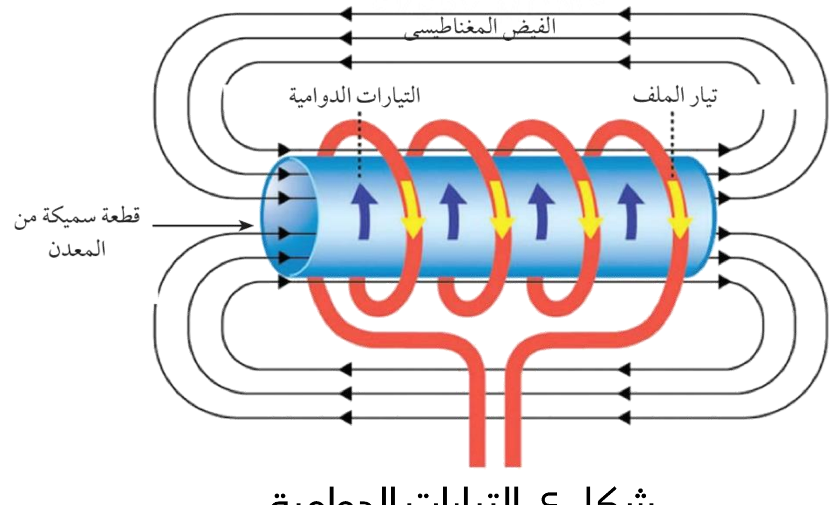
تيارات مستحثة تتولد فى مسارات مغلقة خلال قطعة سميكة من المعدن نتيجة وجودها فى مجال مغناطيسى متغير، ويكون اتجاه التيارات الدوامية عموديّا على اتجاه الفيض المغناطيسى خلال المعدن.

ونحصل على التيارات الدَّوامية عندما:

١ .يمر تيار كهربى متردد فى ملف معزول حول قطعة معدنية مصمتة.

٢ .تحريك قطعة معدنية فى مجال مغناطيسى.

ولتقليل التيارات الدوامية، تشكل القطعة المعدنية فى صورة أسلاك رفيعة أو شرائح رقيقة معزولة عن بعضها لزيادة المقاومة الكهربية ضد التيارات الدوامية.



شكل ٤ التيارات الدوامية

تطبيقات عملية على التيارات الدوامية Application of Eddy current :

للتيارات الدوامية تأثير حرارى يمكن استغلاله فى التنقية الموضعية لأشباه الموصلات مثل الجرمانيوم.
يتم إمرار أنبوبة طويلة ممتلئة بالجرمانيوم أفقيّا وببطء خلال مجموعة من ملفات التسخين الناتج عن التيارات الدوامية، حيث ينصهر جزء صغير من الجرمانيوم عند مرور الأنبوبة خلال الملفات، وتكون المادة المتبلرة بعد مرور الأنبوبة أكثر نقاءً حيث يزداد تركيز الشوائب فى الجزء المنصهر، وتزاح الشوائب محمولة داخل الجزء المنصهر من الجرمانيوم مع مرور الأنبوبة تدريجيّا خلال الملف إلى الطرف البعيد للأنبوبة. نحصل بهذا الأسلوب على بلورة نقية تمامًا، حيث تمثل نسبة الشوائب حينها جزء من 10^{10} من البلورة.



شكل ٥ التأثير الحرارى للتيارات الدوامية

مثال ١

احسب القوة الدافعة الكهربائية المتولدة فى ملف لولبى عدد لفاتة ٤٠٠ لفة إذا تغير التيار الكهربائى فى هذا الملف من 10A إلى صفر خلال زمن قدرة 0.02 s علمًا بأن معامل الحث الذاتى لهذا الملف يساوى 0.2 H

طريقة التفكير فى الحل

١. حلل: اذكر المعلوم وغيرالمعلوم.

المعلوم:

$$L = 0.2\ H$$

$$-10\ A = 10 - 0 = I\ \Delta$$

$$\Delta t = 0.02$$

غير المعلوم؟ Emf = ?   :

٢ .احسب غير المعلوم:

باستخدام العلاقة الرياضية التالية- Emf = IΔtΔ   :

وبالتعويض عن المقادير المعلومة، نجد:

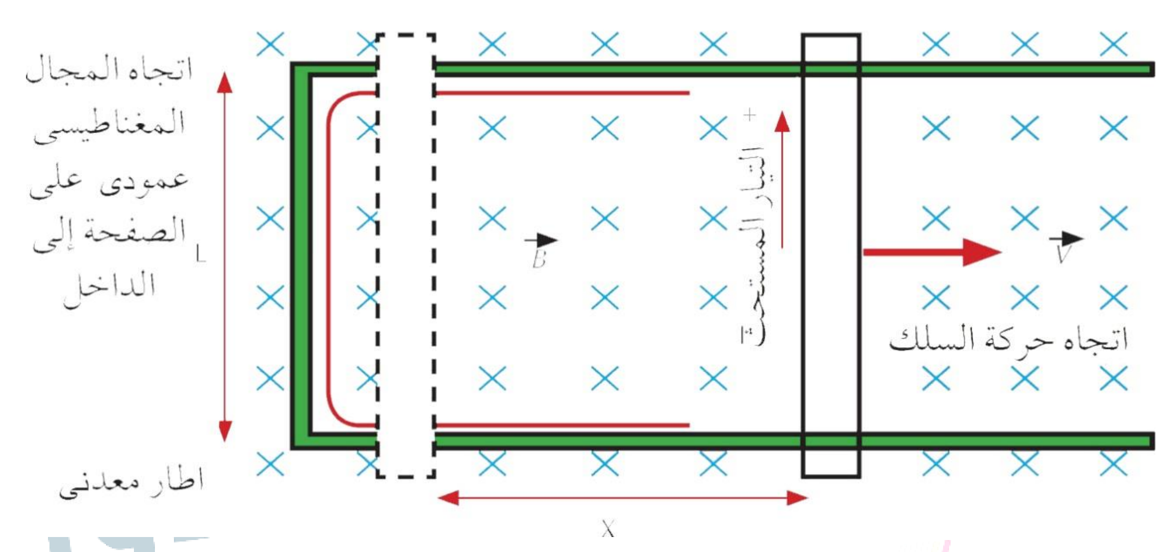
$$(+100)v = (10-)0.02 \times Emf = -0.2$$

٣ .قيم: **هل النتيجة مقبولة؟**

إن النتيجة مقبولة وتبين أن انخفاض التيار الكهربائى فى الملف اللولبى بمعدل كبير يؤدى إلى تولد قوة دافعة كهربائية كبيرة فى نفس الملف لتقاوم هذا التغير.

مولد التيار المتردد (الدينامو)
AC Generator (Dynamo)

عندما يتحرك سلك مستقيم طوله (ℓ) بسرعة خطية (v) عموديّا على اتجاه مجال مغناطيسى منتظم كثافة فيضه (B) شكل ١، تتولد قوة دافعة كهربية (ق د ك) مستحثة بين طرفيه.



شكل ١ الحث فى سلك مستقيم.

إذا كانت إزاحة السلك (Δx) خلال فترة زمنية(Δt)

$$\therefore \Delta A = \ell \, \Delta X$$

يكون التغير فى الفيض $\Delta\Phi_m$ خلال هذه الفترة $= B \times \Delta A$

$$\therefore B \times \Delta A = B \times \ell \times \Delta x$$

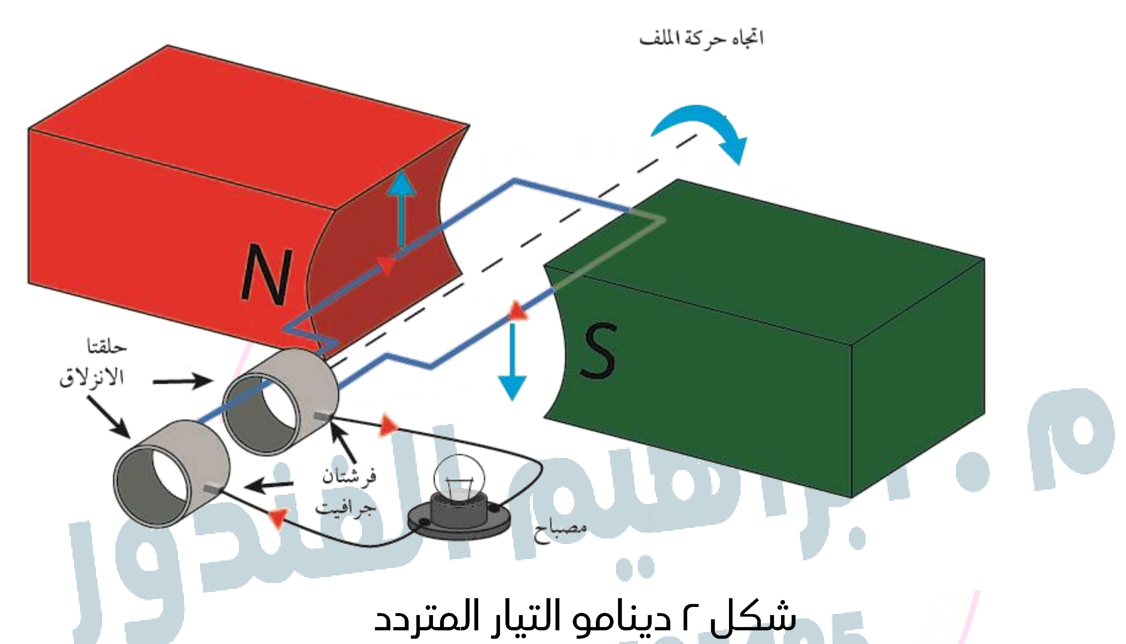
$$\Delta\Phi_m \Delta t \because emf =$$

$$B \times \ell \times \Delta x \Delta t \therefore emf =$$

$$(volt) \qquad B \, \ell \, v \therefore emf =$$

حيث إن $v = xt$ وهى السرعة التى يتحرك بها السلك.
وإذا كان اتجاه حركة السلك يصنع زاوية (θ) مع اتجاه المجال المغناطيسى، فإن القوة الدافعة الكهربية المستحثة تساوى:

(I)→ emf = B ℓ v Sin θ من الأجهزة التى تستثمر الحث الكهرومغناطيسى الدينامو أو مولد التيار المتردد، الذى يحول الطاقة الميكانيكية إلى طاقة كهربية. ويتركب الدينامو)شكل ٢ (من ملف مستطيل من سلك معزول قابل للدوران بين قطبى مغناطيس قوى على شكل حرف U و يتصل طرفا الملف بحلقتين معدنيتين تتلامسان أثناء دورانهما مع فرشاتين من الجرافيت تعملان كقطبى الدينامو .



شكل ٢ دينامو التيار المتردد

آلية عمل المولد الكهربائى Working Mechanism of Dynamo

عند دوران الملف المستطيل بين قطبى المغناطيس بسرعة منتظمة، يتغير معدل قطع الفيض المغناطيسى للملف، فتتولد (ق د ك) مستحثة بين طرفى الملف. وتتغير هذه القوة الدافعة الكهربية لحظيّا مع دوران الملف.

حيث أن الملف يدور فى دائرة نصف قطرها (r) بسرعة خطية $v = \omega r$ حيث (ω) هى السرعة الزاوية وتساوى 2π f، و (f)هى التردد.
وبالتعويض عن (v) فى العلاقة (I)

$$emf = B\ell\omega r \sin\theta$$

وهذا يعنى أن القوة الدافعة الكهربية المستحثة خلال دورة كاملة تساوى

$$emf = 2B\ell\omega r \sin\theta$$

علمًا بأن مساحة وجه الملف $A = 2r \times \ell$

$$emf = BA\omega \sin\theta$$

ونظرًا إلى أن الدينامو ممكن أن يتكون من عدة ملفات ويرمز لها بـN

$$emf = NBA\omega \sin\theta$$

و بناءًا علية تحسب القوة الدافعة الكهربية اللحظية المتولدة بين طرفى ملف الدينامو من العلاقة:

$$emf = NB\, A\, \omega\, Sin\, \theta$$

حيث θ هى الزاوية التى يصنعها اتجاه المجال المغناطيسى مع الخط العمودى على مستوى الملف. ولدينا هنا وضعان مميزان للملف بين قطبى المغناطيس.

١ .عندما يكون مستوى الملف موازياً لاتجاه المجال المغناطيسى، تكون $\theta = 90°$ ويكون $Sin\,\theta = 1$ وتكون (ق د ك) المستحثة $= N\,B\,A\,\omega$ التى تمثل أكبر قيمة للقوة الدافعة الكهربية التى تتولد فى ملف الدينامو.

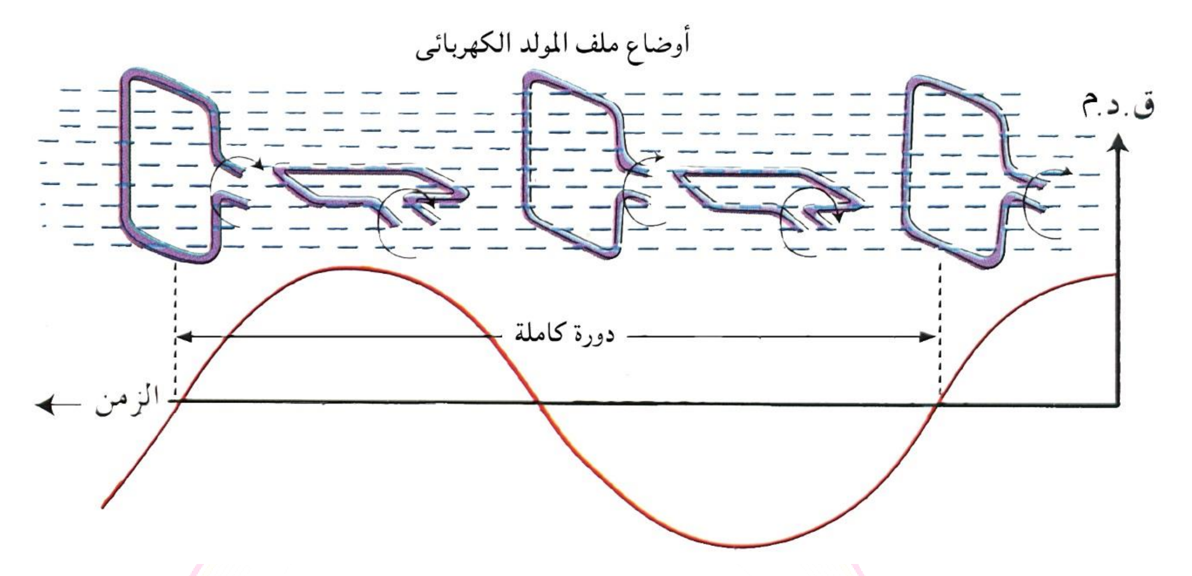
٢ .عندما يكون مستوى الملف عموديّا على اتجاه المجال المغناطيس، تكون $\theta = 0$ ويكون $Sin\,\theta = 0$ وتكون (ق د ك) المستحثة = 0 وتمثل أقل قيمة للقوة الدافعة الكهربية التى تتولد فى ملف الدينامو. وتسمى القوة الدافعة الكهربية التى تتغير لحظيًا وتغير اتجاهها كل نصف دورة وتتبع فى تغيرها منحنى جيبى، بالقوة الدافعة المترددة، ويسمى التيار الناتج عنها بالتيار المتردد.

فالتيار المتردد :هو التيار الذى تتغيرشدته لحظيّا، ويغير اتجاهه كل نصف دورة، ويتبع فى تغيُّره منحنى جيبى.

تردد التيار المتردد :هو عدد الدورات الذى يقوم بها التيار فى الثانية الواحدة.

وتردد التيار المتردد فى منازلنا) = ٥٠ هرتز.

قيمة التيار المتردد Value of Alternative Current



شكل ٣ التيار المتردد

القيمة المتوسطة للقوة الدافعة المترددة أو التيار المتردد خلال دورة كاملة = 0 لأن كل قيمة لحظية فى الأتجاه الموجب يقابلها قيمة مساوية لها فى الاتجاه السالب (شكل ٣). وبالتالى لا يعتبر محدداً مفيداً للجهد المتردد.

مثال ١

مولد تيارمتردد يتكون من ملف أبعاده 5 cm و10 cm مصنوع من (420) لفة، موضوع ليدور حول محوره (3000) لفة فى الدقيقة داخل مجال مغناطيسى منتظم كثافة فيضه تساوى (0.4) Tesla فماذا ستكون القيمة العظمى للقوة الدافعة المستحثة وما قيمتها عند:

١ -مرور ربع دورة.

٢ -مرور ١١٢ من الدورة.

٣ -مضى ١٢٠٠ من وضع الصفر.

طريقة التفكير فى الحل

١.حلل: اذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم:

$$N = 420$$

$$B = 0.4 \text{ Tesla}$$

$f = 3000 \div 60 = 50\ Hz$

A = (5 × 10) × 10 $^{3-}$10 × 5 = $^{4-}$m^{2}

غير المعلوم :القوة الدافعة المستحثة؟

٢ .احسب :**حل غير المعلوم.**

$emf = (emf)_{max} \sin\theta$

$(emf)_{max} = NBA\ \omega = NBA(2\pi f)$

$= 420 \times 0.4 \times (5 \times 10^{-3})(2\pi(50))$

$= 264\ V$

١ .عند مرور ربع دورة

$14 \times 360 = 90$

بالتعويض فى المعادلة الأولى:

$emf = (emf)_{max} \sin\theta$

$= 264 \sin(90)$

$= 264\ V$

٢ .مرور ١١٢ من الدورة.

$112 \times 360 = 30$

بالتعويض فى المعادلة الأولى:

$emf = (emf)_{max} \sin\theta$

$= 264 \sin(30)$

$= 132\ V$

٣ .مضى ١٢٠٠ من وضع الصفر.

$\theta = 2\pi ft$

$= 2\pi(50)\ (1200)$

$= 1.57$

بالتعويض فى المعادلة الأولى:

$emf = (emf)_{max} \sin\theta$

القيمة الفعالة للتيار المتردد
Effective Value of Alternative Current

تساوى جذر متوسط مربع (rms) التيار المتردد، وتعرف بأنها شدة التيار المستمر الذى يولد نفس مُعدَّل الطاقة الحرارية فى موصل معين كتلك التى يولدها التيار المتردد.
أى أنه إذا استبدل المصدر المتردد بمصدر مستمر يمدنا بنفس القدرة فى دائرة معينة، فإن الجهد المستمر لابد أن يكون مساويًا لجذر متوسط مربع الجهد المتردد. وتمثل القيمة الفَعَّالة للتيار المتردد (Ieff) 0.707 من قيمته العظمى (Imax) ويمكن حساب جذر متوسط مربع الجهد والتيار المتردد (الجيبى) من العلاقة:

$$V_{eff} = V_{max} / \sqrt{2}$$

$$I_{eff} = I_{max} / \sqrt{2}$$

بالرغم أن التيار والجهد المترددين يتخذان منحنى جيبى بقيم موجبة وسالبة إلا أن القدرة لها قيم موجبة فقط حيث يوجد تحول للطاقة فى الدائرة. وللوصول لمتوسط القدرة الكهربية المستهلكة نتيجة مرور التيار المتردد نلجأ لجذر متوسط مربع (rms) التيار أوالجهد المتردد.
والقدرة الكهربية المستنفذة فى المقاومة الأومية نتيجة مرور تيار متردد تحسب من العلاقة

$$P = VI = I^2R = V^2/R$$

حيث قيم الجهد والتيار المتردد المستخدمة هى جذر متوسط مربع التيار والجهد.

مثال ١

مكواة ملابس تعمل على مصدر جهد متردد قيمته الفعالة 220 V حيث إن شدة التيار العظمى $(5\sqrt{2})$ A فما هى:

١ .المقاومة الأومية للمكواة؟

٢ .القدرة الكهربية المستنفذة نتيجة مرور تيار متردد؟

طريقة التفكير فى الحل

١ .حلل :**اذكر المعلوم وغيرالمعلوم.**

المعلوم:

القيمة العظمى لشدة للتيار :

$$I_{max} = 5\sqrt{2}\ A$$

القيمة الفعالة للجهد:

$V_{eff} = 220\ V$

غير المعلوم :

المقاومة الأومية للمكواة؟

القدرة المستنفذة نتيجة مرور تيار متردد؟

٢ .احسب :**حل غير المعلوم.**

لحساب شدة التيار الفعال:

$$I_{eff} = I_{max}/2\sqrt{} = 2\sqrt{}5/\ 2\sqrt{} = 5\ A$$

لحساب المقاومة الأومية للمكواة نقوم بالتعويض فى قانون أوم:

$$V = IR$$

$$44\ \Omega = 2205 = V/I = R$$

لحساب القدرة المستنفذة نتيجة مرور تيار متردد نقوم بالتعويض فى القانون التالى:

$$P = VI = I^2R$$

$$= 220 \times 5 = (5)^2 \times 44 = 1100\ Watt$$

تقويم التيار المتردد فى المولد الكهربى
Rectification of Alternative Current in Electric Generator

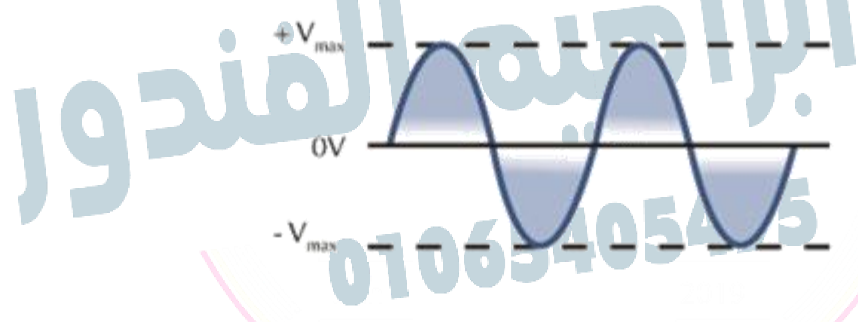
لا يصلح استخدام التيار المتردد (AC) فى الكثير من التطبيقات الحياتية والصناعية، فمثلاً لا يمكن استخدامه فى شحن بطارية الهاتف النقال، كما لا يمكن استخدامه فى تحضير الفلزات مثل الألومنيوم باستخدام التحليل الكهربى، ويتطلب القيام بتلك المهام تحويل التيار المتردد إلى تيار مستمر(DC)، ويطلق على تلك العملية اسم **تقويم التيار المتردد Rectification of Alternative Current**

والمقصود بتقويم التيار المتردد هو تحويل التيار متغير الشدة والاتجاه إلى تيار ثابت الشدة والاتجاه أى تيار مستمر.

ولكى يمكن تحويل التيار المتردد إلى تيار مستمر لابد من إجراء خطوتين رئيسيتين، وهما:

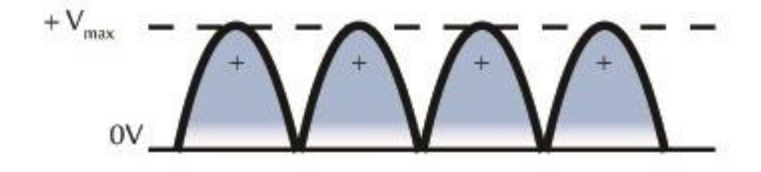
أولاً: توحيد اتجاه التيار

يتميز التيار المتردد بأنه متغير الاتجاه، كما يتضح من)شكل ١(:



شكل ١ تيار متردد

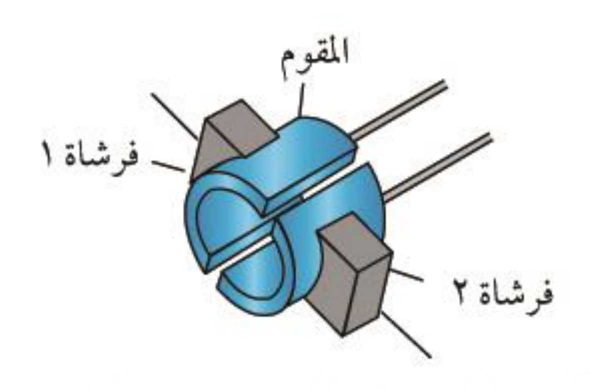
ولكى يمكن تحويل التيار المتردد إلى تيار مستمر لابد من توحيد اتجاه التيار، ويقصد بالتيار الموحد الاتجاه ذلك التيار ثابت الاتجاه)شكل ٢ (ولكن قيمته تتغير من صفر إلى قيمة عظمى ثم إلى صفر، وهكذا.



شكل ٢
تيار موحد الاتجاه

ولكى يمكن تحويل التيار المتردد إلى تيار موحد الاتجاه يتم استبدال حلقتا الانزلاق المعدنيتان فى دينامو التيار المتردد بمقوم التيار) Commutator شكل ٣

تركيب مقوم التيار Structure of Current Rectifier



شكل ٣ مقوم التيار

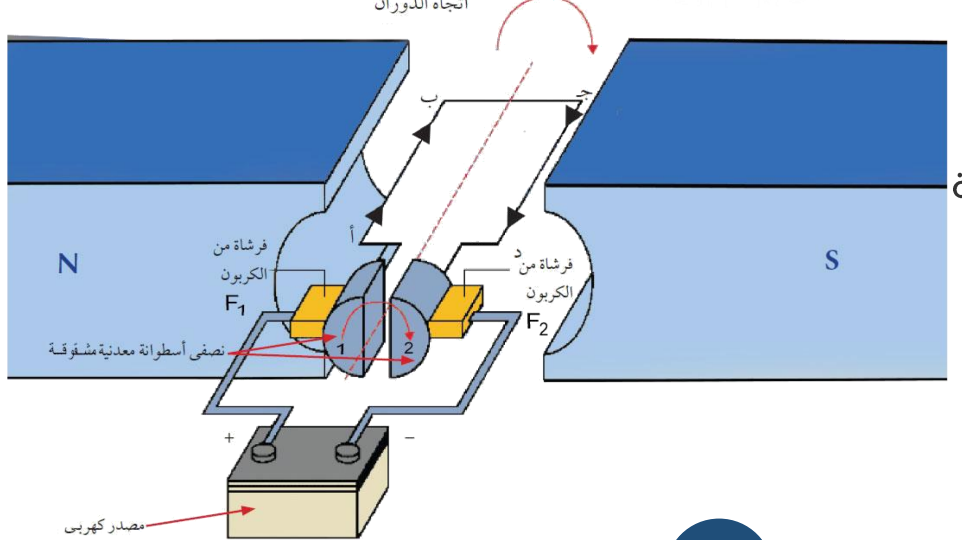
يتركب مقوم التيار من:

١ .أسطوانة معدنية جوفاء مشقوقة إلى نصفين (1، 2) معزولين تماماً ويملأ الشق الموجود بينهما بمادة عازلة، ويتم تثبيت نصفا الاسطوانة المعدنيين على محور الدوران ويدوران حول نفس محور الدوران.

٢ .الفرشتان (F_2 ،F_1) واللتان تلامسان نصفى الاسطوانة أثناء دورانها، وتلامس الفرشتان المادة العازلة بين نصفى الأسطوانة فى اللحظة التى يكون فيها مستوى الملف عمودياً على خطوط الفيض المغناطيسى، أى فى اللحظة التى تكون فيها القوة الدافعة الكهربية المتولدة فى الملف تساوى صفراً.

عمل مقوم التيار Working of Current Rectifier

إذا أخذنا فى الاعتبار أن الملف سيبدأ فى الدوران فى الاتجاه المبين)شكل ٤ (فإنه:



شكل ٤ استخدام الأسطوانة المشقوقة يوحد التيار.

أ. فى نصف الدورة الأول:

- ستكون الفرشاة F_1 ملامسة لنصف الأسطوانة 1 والفرشاة F_2 ملامسة لنصف الأسطوانة 2.
- يتحرك الجانب (أ ب) إلى أعلى، وبتطبيق قاعدة فلمنج لليد اليمنى نجد أن التيار الكهربى سيمر فى الملف فى الاتجاه)أ ب جـ د(، ويترتب على ذلك أن يمر التيار فى الدائرة الخارجية من الفرشاة F_1 إلى الفرشاة F_2 خلال النصف الأول من الدورة.

ب. فى نصف الدورة الثانى:

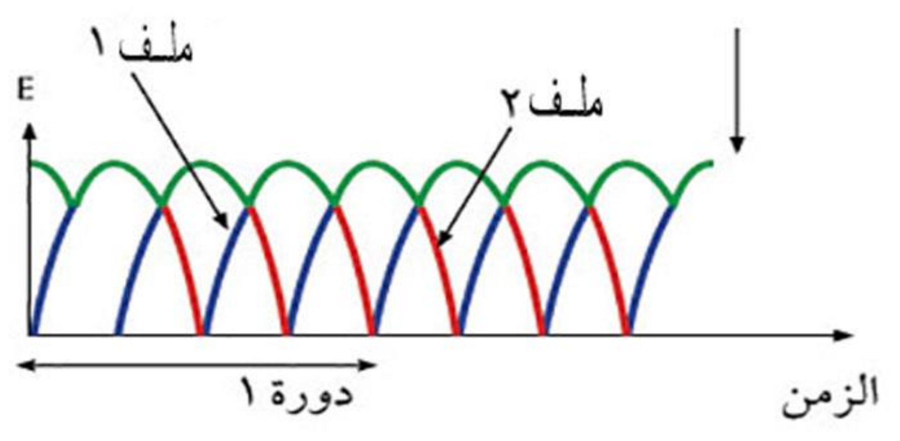
- ستكون الفرشاة F_1 ملامسة لنصف الأسطوانة 2 والفرشاة F_2 ملامسة لنصف الأسطوانة 1.
- يتحرك الجانب (ب جـ) إلى أعلى، وبتطبيق قاعدة فلمنج لليد اليمنى نجد أن التيار يعكس اتجاهه فى الملف بمعنى أن التيار الكهربى سيمر فى الملف فى الاتجاه (د جـ ب أ)، ويترتب على ذلك أن يمر التيار فى الدائرة الخارجية من الفرشاة F_1 إلى الفرشاة F_2 خلال النصف الثانى من الدورة. وهو نفس اتجاهه فى النصف الأول من الدورة ومع استمرار الدوران تظل الفرشاة F_1موجبة والفرشاة F_2 سالبة. لذلك يكون التيار الكهربى فى الدائرة الخارجية موحد الاتجاه دائماً (شكل ٢).

ثانيًا: تحويل التيار الموحد الاتجاه إلى تيار ثابت الشدة تقريبًا)تيار مستمر(:

وعلى الرغم من أن القوة الدافعة الكهربية الناتجة أصبحت فى اتجاه واحد إلا أنها ليست ثابتة القيمة فمقدارها يتغير من صفر إلى نهاية عظمى ثم إلى صفر كل نصف دورة من دورات الملف. وهذا يعنى ان التيار يكون غير ثابت الشدة.

وللحصول على تيار كهربى موحد الاتجاه ثابت الشدة تقريبًا يتم استخدام عدة ملفات بينها زوايا صغيرة.

وعلى سبيل المثال فإن القوة الدافعة الكهربية الناتجة عن استخدام ملفين تكون على النحو المبين فى)شكل ٥(، ولك أن تتخيل ما يحدث عند زيادة عدد الملفات.



شكل ٥
القوة الدافعة الناتجة عن استخدام ملفين فقط.

وحين يتم استخدام أكثر من ملف داخل المولد فإن الأسطوانة المعدنية المجوفة تشق إلى عدد من الاجزاء يساوى ضعف عدد الملفات، فتكون شدة التيار الكهربى المار فى الدائرة الخارجية ثابتة القيمة تقريبًا، وبهذه الكيفية يتم الحصول فعليًا على مولد ثابت الشدة (DC generator).

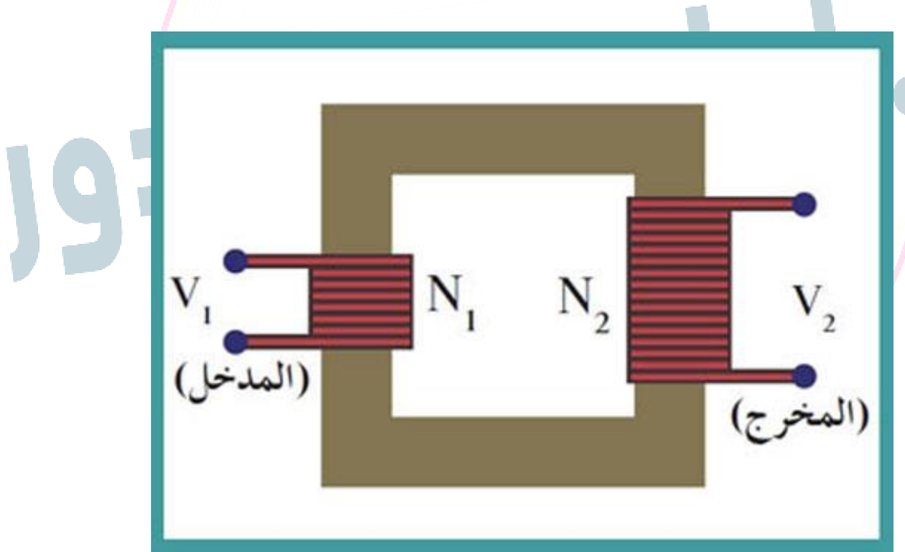
المحول الكهربى
Transformer

تعريف المُحوِّل الكهربىDefinition of Transformer

المُحوِّل الكهربى Transformer هو جهاز يعمل على رفع أو خفض القوّة الدافعة الكهربية المتردّدة الناتجة عن مصدر جهد كهربى مُتردِّد من دون أن يُحدث أى تعديل على مقدار التردّد. كما أنّه يُستخدَم فى نقل الطاقة الكهربية من محطّات التوليد إلى أماكن الاستهلاك بدون خسارة تُذكَر.

تركيب المُحوِّل الكهربىStructure of Transformer

تتكوّن المُحوِّل الكهربى من ملفّين ملفوفين حول قلب من الحديد، وهما: الملفّ الابتدائى وعدد لفّاته N_1 ويتّصل بدائرة التيّار المتردّد. الملفّ الثانوى وعدد لفّاته N_2 ويتّصل بدائرة الحمل)شكل ا



شكل (ا)
يتألّف المحوّل الكهربى من ملفّ ابتدائى وملفّ ثانوى.

كيفية عمل المُحوِّل الكهربىHow Transformer Works

إنّ التيّار الكهربى المتردّد فى الملفّ الابتدائى يؤدّى إلى تدفّق مغناطيسى متغيّر تنتج عنه قوّة دافعة كهربية عند طرفيه، وتُحسَب بحسب قانون فاراداى باستخدام المعادلة التالية:

$$Emf_1 = -N_1 \Delta\phi / \Delta t$$

تنتشر خطوط المجال المغناطيسى عبر القلب الحديدى، ويحدث تغيُّر فى التدفُّق المغناطيسى فى الملفّ الثانوى حيث تتولّد قوّة دافعة كهربية متردّدة عند طرفيه تُحسَب بحسب قانون فاراداى باستخدام المعادلة التالية:

$$Emf_2 = -N_2 \Delta\emptyset / \Delta t$$

ويمرّ فى دائرة الملفّ الثانوى المغلقة تيّار حثّى متردّد له تردّد المصدر نفسه. ولإيجاد علاقة بين القوّتين الدافعتين الكهربيتين على ملفّى المُحوِّل، وانطلاقاً من أنّ معدّل تغيُّر التدفّق $\Delta\emptyset/\Delta t$ هو نفسه فى الملفّين، نستنتج من المعادلتين السابقتين العلاقة الرياضية التالية:

$$Emf_2 / Emf_1 = N_2 / N_1$$

وبإهمال مقاومة الملفّين فإنّ القوّة الدافعة الكهربية المتولّدة بين طرفى كلّ ملفّ تساوى فرق الجهد الحثّى المتولّد بين طرفى كلّ منهما وبالتالى نستنتج أن:

$$V_2 / V_1 = N_2 / N_1$$

ومن خلال هذه المعادلة، يمكن أن نحدّد نوعين من المُحوِّلات:

- فى حال $N_2 > N_1$ تكون $V_2 > V_1$ ويُسمّى المُحوِّل «مُحوِّلاً رافعاً للجهد.»
- فى حال $N_2 < N_1$ تكون $V_2 < V_1$ ويُسمّى المُحوِّل «مُحوِّلاً خافضاً للجهد.»

ولإيجاد علاقة بين التيارين الكهربيين فى ملفّى المُحوِّل، ننطلق من مبدأ حفظ الطاقة الذى يتحكّم دائماً بما يحدث. فالمُحوِّل ينقل الطاقة من ملفّ إلى آخر، ومعدّل نقل الطاقة هو القدرة، والقدرة المستخدَمة فى الملفّ الثانوى مستمَدّة من القدرة الموجودة فى الملفّ الابتدائى. وبإهمال القدرة الضئيلة التى تُفقَد، فإنّ القدرة الداخلة إلى المُحوِّل عبر الملفّ الابتدائى (P_1) تساوى القدرة الناتجة عبر الملفّ الثانوى (P_2)، وهى تُعتبَر حالة مثالية بحيث يسمّى المُحوِّل، الذى لا يسبّب أى خسارة فى القدرة بين الملفّين، المُحوِّل المثالى. وحيث إنّ القدرة الكهربية تساوى حاصل ضرب القوّة الدافعة الكهربية والتيّار الكهربى، نكتب:

$$P_1 = P_2$$

$$V_1 I_1 = V_2 I_2$$

وبالتالى نستنتج أنّ:

$$V_2 / V_1 = I_2 / I_1$$

وتبين هذه المعادلة التناسب العكسى بين شدّة التيّار فى الملفّ وفرق الجهد بين طرفيه، فعند رفع الجهد تنخفض شدّة التيّار. ولكن تظهر التجارب العملية عدم وجود محوّل مثالى.

هناك عدة أسباب لفقد الطاقة الكهربية خلال المحول مما يقلل من كفاءته:

١ .يتحول جزء من الطاقة الكهربية إلى طاقة حرارية فى أسلاك الملفين بسبب مقاومتها الأومية، ولتقليل هذا الفقد تُصنَع هذه الأسلاك من النحاس لصغر مقاومته النوعية.

٢ .يتحول جزء من الطاقة الكهربية إلى طاقة حرارية فى القلب المعدنى لتولد تيارات دوامية، ولتقليل هذا الفقد يُصنَع القلب من شرائح رقيقة من الحديد المطاوع السليكونى معزولة جيداً عن بعضها البعض.

٣ .يتحول جزء من الطاقة الكهربية إلى طاقة ميكانيكية فى القلب المعدنى بسبب تحرك جُزيئاته المغناطيسية، ولتقليل هذا الفقد يُصنَع القلب المعدنى من الحديد المطاوع لسهولة حركة جُزيئاته المغناطيسية.

لذا نعرّف كفاءة المُحوِّل Transformer Efficiency على أنّها النسبة بين القدرة الكهربية فى الملفّ الثانوى إلى القدرة الكهربية فى الملفّ الابتدائى ويُعبَّر عنها رياضيّا بالمعادلة التالية:

$$\eta = P_2 / P_1 \times 100$$

علمًا أنّ كفاءة المحوّلات الكهربية المتوفّرة فى الأسواق تتراوح بين 92 % و 98 % وهى جيّدة جدّا إذا ما قارنّاها مع كفاءة أجهزة كهربية أخرى.

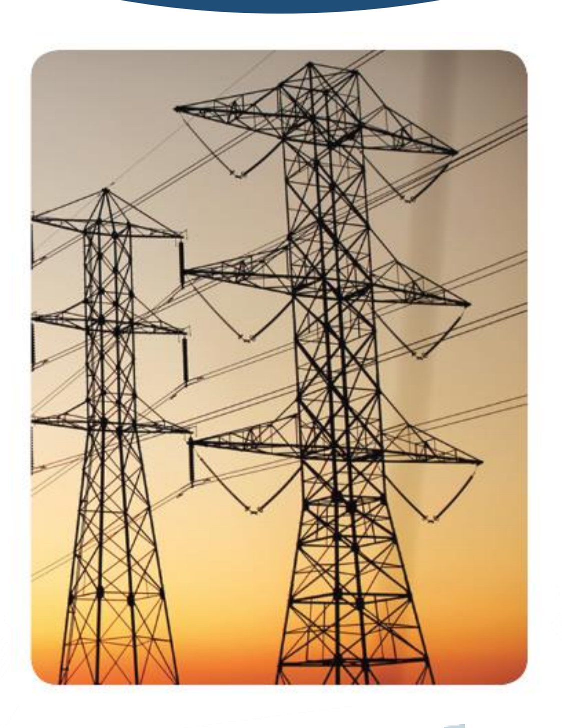
تطبيقات على المُحوِّل الكهربى Applications of Transformer

تقوم المحولات الكهربية بدور اقتصادى مهم فى نقل الطاقة الكهربية المتولدة فى محطات توليد الطاقة الكهربية، وأماكن استهلاك هذه الطاقة.

فعند محطات التوليد توجد محولات رافعة للجهد تقوم بخفض قيمة التيار الكهربى المنقول فى خطوط النقل.

وحيث إن القدرة الكهربية المفقودة فى الأسلاك أثناء نقل الطاقة الكهربية تتناسب طرديّا مع مربع قيمة التيار المار فى الأسلاك، فإن تقليل قيمة التيار إلى العشر يقلل الفقد فى القدرة الكهربية فى الأسلاك إلى 1/ 100من قيمتها الأولى، وهذا يساعد على نقل الطاقة الكهربية لمسافات كبيرة دون فقد يذكر.

عند أماكن استهلاك الطاقة الكهربية توجد مُحوِّلات خافضة للجهد لتُخفِّض الجهد إلى القيمة المناسبة لتشغيل معظم الأجهزة الكهربية المنزلية.



شكل (٢) أبراج الضغط العالى

مثال (١)

محوّل مثالى تتألّف ملفّه الابتدائى من (٥٠) لفّة وملفّه الثانوى من (٥٠٠) لفّة، وفرق الجهد على ملفّه الابتدائى ساوى $(10)V$.
(أ) حدِّد نوع المُحوِّل الكهربى المُستخدَم.
(ب) احسب فرق الجهد على طرفى ملفّه الثانوى.

طريقة التفكير فى الحلّ

١ .حلِّل :أُذكر المعلوم وغير المعلوم.

المعلوم:

$$V_1 = (10)V$$
$$N_1 = (50)turns$$
$$N_2 = (500)turns$$

غير المعلوم:

(أ) نوع المُحوِّل الكهربى

(ب) $V_2 = ?$

٢ .احسب غير المعلوم:

(أ) بما أنّ: $N_2 > N_1$

نستنتج أنّ المُحوِّل هو مُحوِّل رافع للجهد.
(ب) باستخدام المعادلة التالية:

$$V_2 / V_1 = N_2 / N_1$$

وبالتعويض عن المقادير المعلومة، نستنتج أنّ:

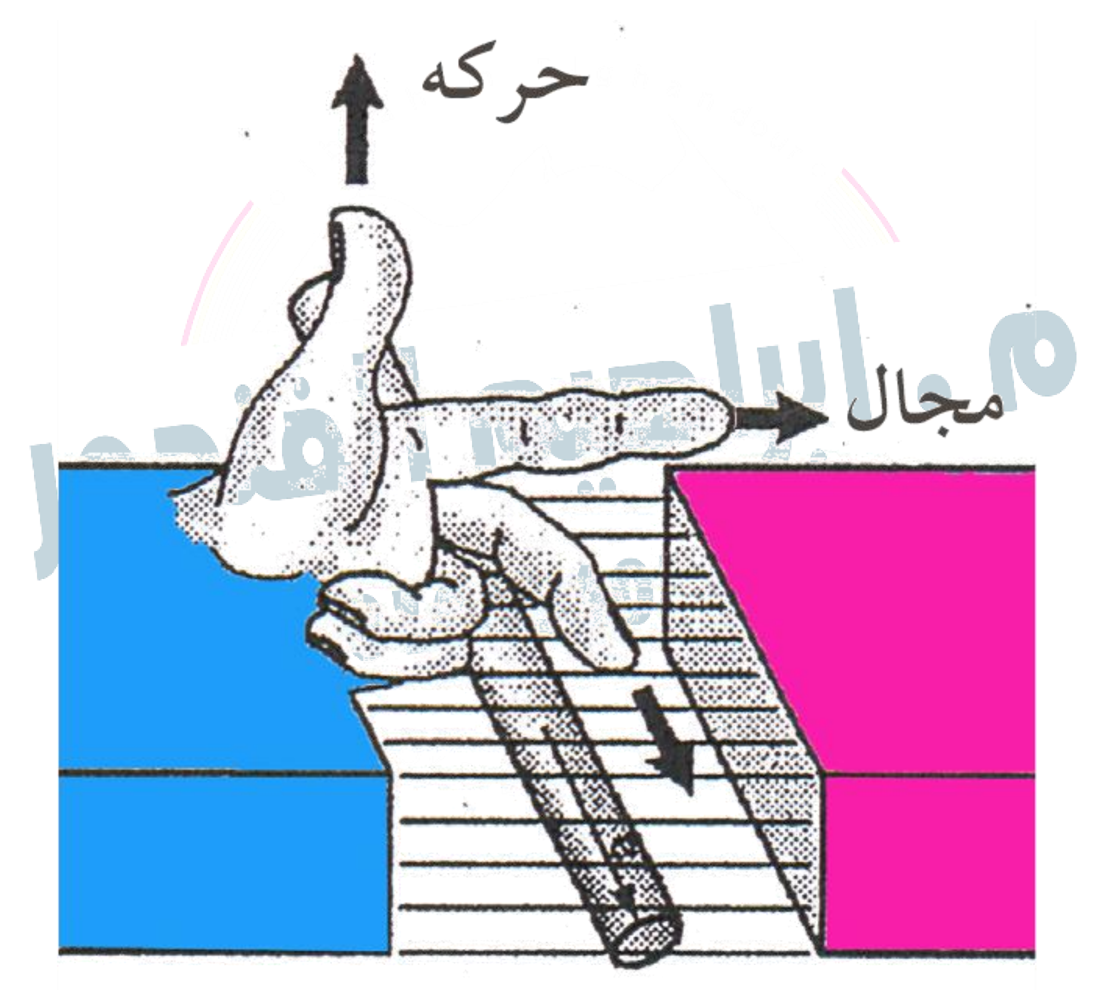
$$V_2 10 = 50050$$
$$V_2 = (100)V$$

٣ .قيم:
هل النتيجة مقبولة؟ إنّ النتيجة مقبولة حيث إنّ فرقِ الجهد علىِ الملفّ الثانوى أكبر من فرق الجهد على الملفّ الابتدائى وهذا متوقَّع لأنّ المُحوِّل المُستخدَم فى هذا المثال هو مُحوِّل رافع للجهد.

المحرك الكهربى (الموتور)
Electric Motor

الغرض منه :تحويل الطاقة الكهربية إلى طاقة ميكانيكية باستخدام مصدرللتيار المستمر.

نظرية المحرك الكهربى :أثبت العالم ميشيل فارادای عمليا وبنجاح أنه إذا مر تيار كهربى فى سلك قابل للحركة، وكان السلك يقطع مجالاً مغناطيسيّا، فإن السلك يتحرك عمودياً على اتِّجاه خطوط الفيض المغناطيسى.

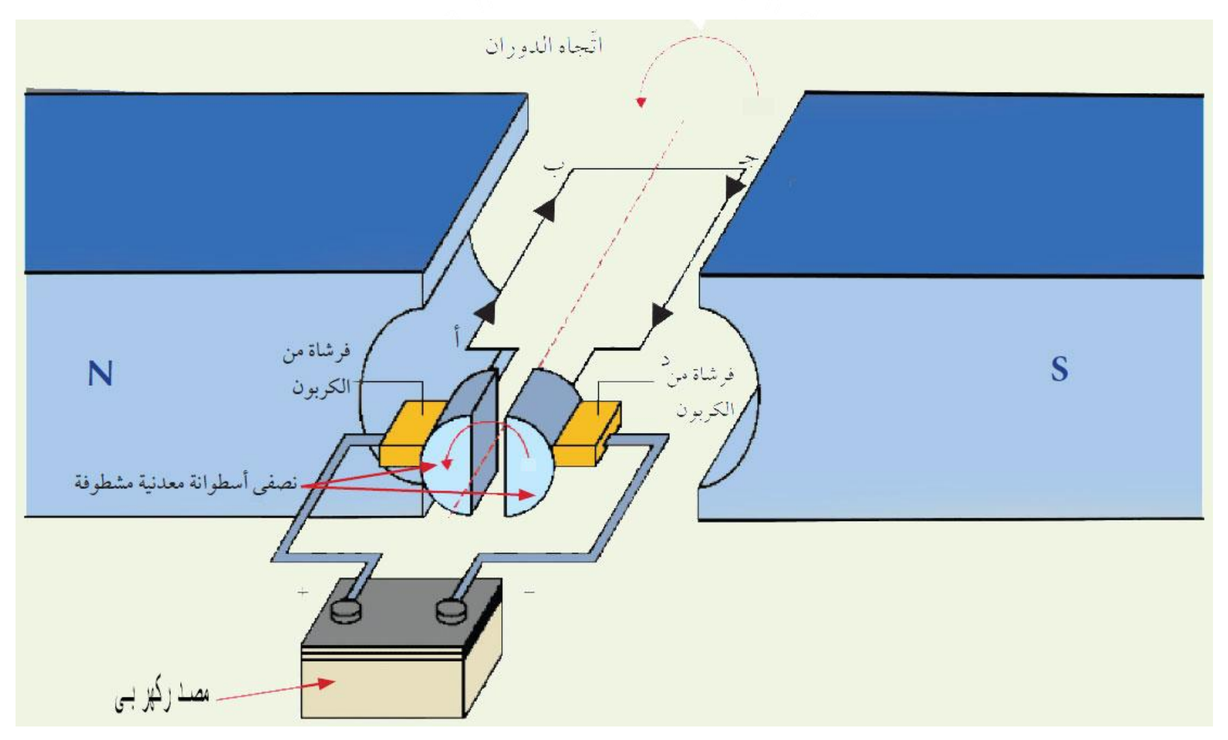


شكل (ا)

ويتوقف اتِّجاه حركته علي كل من اتِّجاه التيار فى السلك، واتِّجاه خطوط الفيض المغناطيسى، ويمكن تعين اتِّجاه حركة السلك بتطبيق قاعدة فلمنج لليد اليسرى)شكل ا

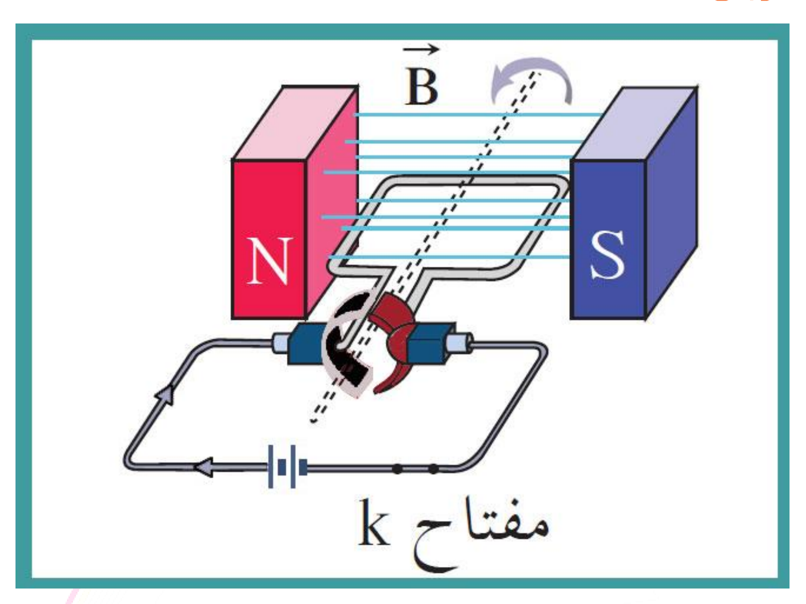
تركيب المُحِّرك الكهربىّ Installation of Electric Motor

يتركب فى أبسط أشكاله من ملف من سلك نحاسى معزول وملفوف فى تجويف مستطيل حول أسطوانة من صفائح من الحديد المطاوع المعزولة، ويدور الملف والأسطوانة بين قطبى مغناطيس قوى دائم على شكل حدوة الفرس على محور دوران واحد من الصّلب، وتتصل طرفا الملف بنصفى أسطوانة معدنة معزولتن عن بعضهما ومثبتتن على محور الدوران بعد عزلهما عنه. ويكون مستوى المادة العازلة بن نصفى الأسطوانة عمودىّا على مستوى الملف، ويلامس نصفى الأسطوانة فرشتان ثابتتان من الكربون ومتقابلتان، وذلك حينما يكون مستوى الملف موازيًا لمحور المغناطيس)شكل ٢(، وتتصل الفرشتان بمصدر للتيار الكهربى المستمر، وتعمل هاتان الفرشتان كمدخل ومخرج للتيار الكهربى فى الملف.



شكل (٢)
المحرك الكهربى

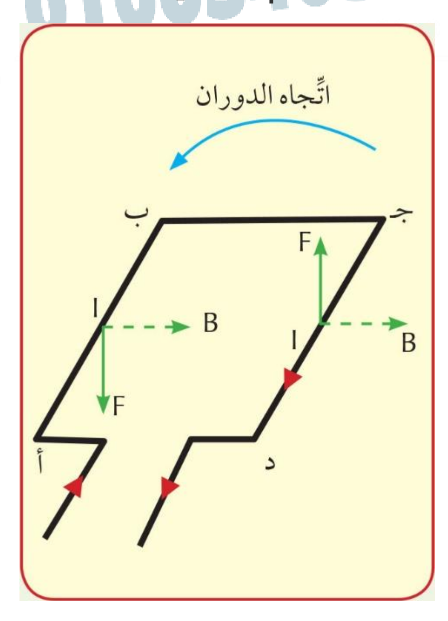
آليَّة عمل المُحرِّك الكهربىّ Working Mechanism of Electric Motor



شكل (٣)

١ .نبدأ عندما يكون مستوى الملف منطبق على خطوط الفيض المغناطيسى، وفى هذه الحالة تكون الفرشاتان ملامستين لنصفى الأسطوانة المعدنية كما فى)شكل ٣

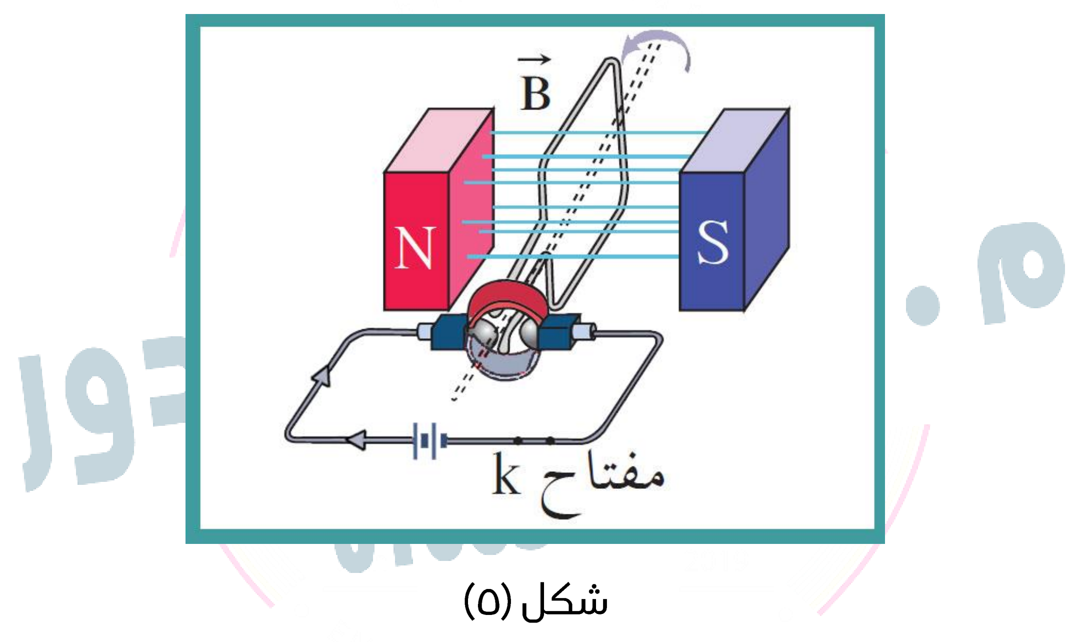
٢ .إن الضلعين المتوازين أ ب ، جـ د موضوعان فى مجال مغناطيسى عمودى عليهما ويحملان تيارًا كهربائيًا فى الاتجاهات المبينة بالأسهم(شكل ٤)،



شكل (٤) دوران ملف المحرك الكهربى.

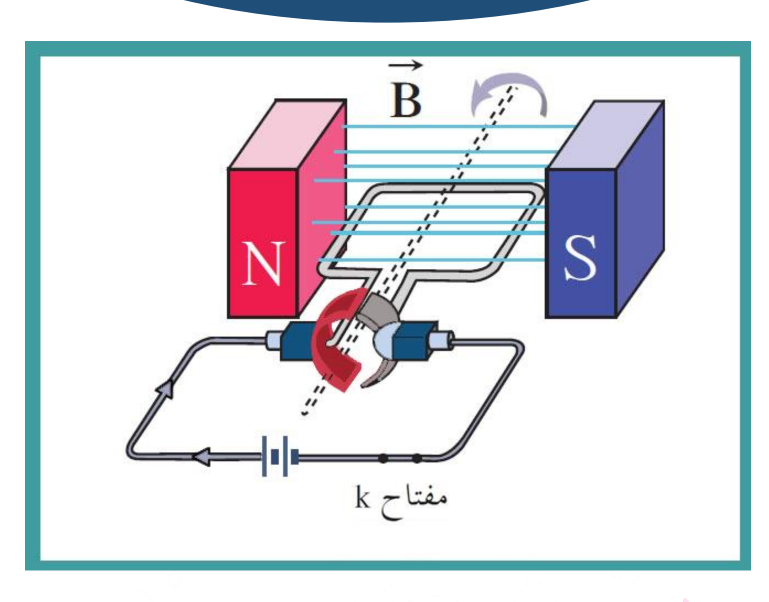
فإن المجال يؤثر على كل منهما بقوة (F) يكون اتجاهها عمودياً على كل من طول السلك الذى يمر فيه التيار (I) واتِّجاه خطوط الفيض المغناطيسى الذى كثافته (B) حيث إن. F = LIB :

٣ .بتطبيق قاعدة فلمنج لليد اليسرى عند كل ضلع نلاحظ أن القوة المؤثرة على الضلع)أ ب (تعمل لأسفل، بينما تؤثر القوة على ضلع (جـ د) لأعلى ويختلف اتجاهى القوتين لاختلاف اتجاهى التيار الكهربى فى الضلعين (شكل ٤)، وبذلك توجد قوتان F ، Fمتساويتان فى المقدار ومتضادتين فى الاتِّجاه وخَطَّا عملهما ليس على استقامة واحدة، ونتيجة لذلك يتولد ازدواج عزمه يسبب دوران مستوى الملف فى اتِّجاه عكس اتِّجاه عقربى الساعة.



شكل (٥)

٤ .ومع دوران الملفّ يقلّ العزم تدريجيّا على الملفّ حتى ينعدم عندما يصبح مستوى الملفّ عموديّا على خطوط المجال حيث ينعدم مرور التيّار الكهربائى لعدم اتّصال نصفى الحلقة بالفرشاتين (شكل ٥



شكل (٦)

٥ .ولكن يستمرّ دوران الملفّ بسبب قصوره الذاتى ليتجاوز هذه الوضعية ويعود التلامس بين الفرشاتين ونصفى الحلقة اللتين تبادلتا المواقع فينعكس اتّجاه التيار الكهربى فى ضلعى الملف بحيث تعمل القوة (F) على إدارة الملف فى نفس الاتِّجاه (شكل٦)؛ أى أن انعكاس اتِّجاه التيار (ا) فى الفرعين، كل نصف دورة ضرورى لاستمرار الحركة الدورانية فى اتِّجاه واحد.